

# 油麦兼用斜锥型孔轮式集排器设计与试验

邢鹤琛 廖庆喜 王 磊 王 都 廖宜涛 王 迪 余 琦

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

**摘要** 为满足长江中下游地区油菜和小麦播种要求、提高播种机作业效率、简化播种机结构并有效控制机械式排种方式的种子易破损和堵塞型孔等问题,设计一种无需清种与护种装置的油麦兼用斜锥型孔轮式集排器,提出一种油菜双圈、小麦三圈型孔交错排布以及斜锥形型孔结构。构建充种、携种、投种和输种等过程的力学模型,分别确定排种器充种时的最小充填高度比基准高度低 10 mm、验证该集排器结构的合理性、得到油菜小麦型孔后倾角分别低于 30°和 15°时,油菜和小麦的最大投种角分别可达 40.8°、34.4°以及油菜和小麦输种管与水平面夹角需不小于 33°。正交试验结果显示,油菜型孔后倾角 20°、充填高度为基准高度、转速 20 r/min,小麦型孔后倾角 5°、充填高度 20 mm、转速 15 r/min,油菜、小麦各行排量一致性变异系数分别低于 6.00%、6.32%,总排量稳定性变异系数分别低于 1.25%、1.00%,破损率均低于 0.5%。田间试验表明,油菜、小麦播种试验出苗效果良好。

**关键词** 兼用型排种器;斜锥型孔轮;破损率;多行排种;油菜;小麦

**中图分类号** S 223.2<sup>+</sup>3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2019)05-0143-09

油菜和小麦分别是长江中下游地区主要的油料、粮食作物,两者播期毗邻,且机械化直播工序均包括旋耕、开沟、播种、施肥和覆土等作业环节<sup>[1]</sup>。研究油麦兼用播种技术,即同一机具能同时完成油菜、小麦 2 种作物的播种作业,可有效降低机械化生产投入成本,提高机具的利用率。播种环节的关键在于排种技术<sup>[2-3]</sup>,而排种器的优劣决定了播种质量的高低。目前,对不同作物专用型排种器<sup>[4-6]</sup>的研究较多,特别是有关油菜<sup>[7-10]</sup>、小麦<sup>[11-14]</sup>等作物专用型排种器的研究已取得一定成果。兼用型排种器具备可同时完成 2 种或多种作物排种以及降低生产成本等优势,我国学者正逐渐对其展开探索研究。杨波等<sup>[15]</sup>设计了一种气力式油菜、小麦兼用型精量排种器,同时确定了排种滚轮、护种板、气室等关键部件的主要结构参数;张宇文<sup>[16]</sup>设计了一种能够实现一机多用的机械式多功能精密排种器;丛锦玲等<sup>[17]</sup>通过在小麦排种盘内嵌入导种条,设计了一种油菜小麦兼用型气力式精量排种器;雷小龙等<sup>[18]</sup>采用机械定量供种,气流分配成行方式对油麦兼用型气送式集排器进行了深入的研究,该集排器油菜小麦采用

同一种型孔,通过改变供种装置型孔轮数量实现油麦兼用。综上,由于机械式排种器具有易破损、排种精度不高等问题<sup>[19-20]</sup>,我国现有的兼用型排种器仍以单体气力式居多,而兼用型集排器可同时完成 3 行及以上的排种作业,有利于简化播种机结构,提高播种效率,是目前排种技术发展的新方向。

本研究结合油菜、小麦种子的物料参数和种植农艺要求,设计一种可实现油麦兼用的斜锥型孔轮式集排器,通过调节适用于油菜、小麦的型孔轮及充种漏斗实现油菜小麦兼用播种,一次性完成多行排种,简化播种机结构,旨在为油麦兼用机械式排种器设计提供参考。

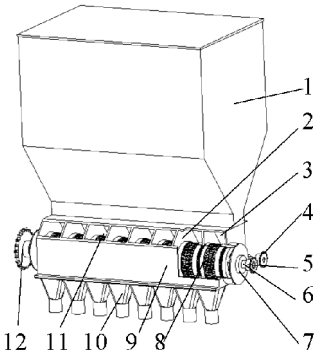
## 1 材料与方法

### 1.1 集排器结构及工作原理

1)集排器结构。油麦兼用斜锥型孔轮式集排器结构如图 1 所示,包括种箱、外壳、主轴、型孔轮、充种漏斗、投种口等,其中,型孔轮是其关键部件。

2)工作原理。型孔轮单元固定在集排器主轴上,主轴轴向移动,带动型孔轮移动,调节型孔轮相

对外壳内板的位置,实现油菜、小麦型孔之间的切换。播种油菜时,内板的弧形凸板遮挡小麦型孔区域露出油菜型孔区域。播种小麦时,内板的弧形凸板遮挡油菜型孔区域露出小麦型孔区域,由于小麦的流动性能较差,需安装搅种装置,增加小麦种群扰动。搅种装置安装在充种漏斗下部的充种室内,且转动方向与排种器主轴方向一致,可改善小麦种子的流动性,提高充种性能。



1.种箱 Seed box; 2.内板 Inner plate; 3.充种漏斗 Filling funnel; 4.搅种装置 Seed churning device; 5.副链轮 Secondary sprocket; 6.主轴 Main shaft; 7.端盖 End cover; 8.型孔轮 Hole-type wheel; 9.外壳 Shell; 10.投种口 Throw mouth; 11.视窗口 View window; 12.主链轮 Main sprocket.

图 1 油菜兼用斜锥型孔轮式集排器结构示意图  
Fig.1 Structure of oblique taper hole-type wheel centralized metering device for rapeseed and wheat

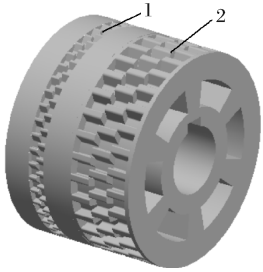
集排器工作时,种子从种箱下落,经过充种漏斗进入充种室,经传动系统带动主链轮转动,从而驱动主轴,型孔轮随主轴转动,充种室中的种子在种群挤压力、重力及离心力等作用下充入型孔,完成充种过程。型孔轮转动,将重心在型孔外侧的种子清种,落回充种室,充入型孔中的种子随型孔轮转动进入投种区,在重力和离心力作用下落入投种口,并沿输种管落入种沟内。

1.2 型孔轮结构与参数分析

型孔轮单体由油菜型孔区和小麦型孔区构成,型孔轮结构示意图见图 2。为保证连续均匀排种,型孔轮结构采用多圈型孔交错排布形式。

集排器排种量应与农艺要求的排种量相等<sup>[21]</sup>,由式(1)可确定型孔轮相关结构参数。

$$\begin{cases} M_p = \lambda k a x Z n \\ M_n = \frac{100\pi D_d n_d S Q (1+c)}{m_q} \\ M_p = M_n \\ i = \frac{n}{n_d} \end{cases} \quad (1)$$



1.油菜型孔区 The type hole zone for rapeseed; 2.小麦型孔区 The type hole zone for wheat.

图 2 型孔轮结构示意图

Fig.2 Structure of hole-type wheel

式(1)中,  $M_p$  为集排器单位时间排种量,粒/min;  $\lambda$  为理论充种概率;  $k$  为排种行数,  $k=8$ ;  $a$  为型孔排布圈数;  $x$  为单个型孔充种粒数,取 1~2;  $Z$  为型孔轮单圈齿数;  $n$  为集排器主轴转速, r/min;  $M_n$  为单位时间农艺要求播种量,粒/min;  $D_d$  为地轮直径, m;  $n_d$  为地轮转速, r/min;  $S$  为直播机幅宽,  $S=2$  m;  $Q$  为农艺要求播种量,长江中下游地区油菜、小麦播种量  $Q$  分别为  $3\sim6^{[22]}$ 、 $120\sim225$  kg/hm<sup>2</sup><sup>[23]</sup>;  $c$  为地轮滑移系数,  $c=0.05\sim0.12$ ,取 0.08;  $m_q$  为种子千粒重,油菜  $m_{q1}=4.72$  g,小麦  $m_{q2}=48.77$  g;  $i$  为传动比。

结合油菜、小麦种子物料特性,取油菜理论充种概率  $\lambda_1$  为 1.0,取小麦理论充种概率  $\lambda_2$  为 0.7~1.0<sup>[24]</sup>。由型孔交错排布原理<sup>[24]</sup>,结合型孔宽度,油菜、小麦型孔轮单圈齿数分别为  $Z_1=45$ 、 $Z_2=30$ 。由于油菜、小麦农艺要求排种量差异较大,结合兼用要求,油菜小麦传动比  $i$  分别取 0.5~1.5、1.0~1.8。将以上参数代入式(1),得到油菜小麦型孔排布圈数分别为  $a_1=0.24\sim2.88$ 、 $a_2=2.17\sim8.13$ ,由于型孔交错排布结构要求型孔排布圈数至少为 2 圈,且型孔排布圈数越少,型孔轮宽度越小,进而集排器横向尺寸越小,可使集排器结构更紧凑、合理,故油菜型孔排布圈数  $a_1$  取 2 圈,小麦型孔排布圈数  $a_2$  取 3 圈。

以长江中下游典型的油菜小麦种子品种华油杂 62、郑麦 9023 为主要研究对象,开展型孔结构设计。根据型孔计算公式<sup>[21]</sup>,型孔长度  $L_z$ 、型孔宽度  $B_z$  和型孔深度  $H_z$  分别为:

$$\begin{cases} L_z = l_{z \max} + k_l \\ B_z = b_{z \max} + k_b \\ H_z = h_{z \max} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中,  $L_z$  为型孔长度, mm;  $l_{z\max}$  为种子最大长度, mm;  $k_l$  为型孔长度调节系数,  $k_l = 1 \sim 1.5$  mm;  $B_z$  为型孔上部宽度, mm;  $b_{z\max}$  为种子最大宽度, mm;  $k_b$  为型孔宽度调节系数,  $k_b = 0.7 \sim 1$  mm;  $H_z$  为型孔深度, mm;  $h_{z\max}$  为种子最大高度, mm。

根据式(2)代入油菜、小麦种子的三轴尺寸参数<sup>[1]</sup>, 可确定油菜种子型孔参数  $L_{z1}$  为 3.1~3.6 mm、 $B_{z1}$  为 2.78~3.08 mm、 $H_{z1}$  为 2.1 mm, 小麦种子型孔参数  $L_{z2}$  为 7.71~8.21 mm、 $B_{z2}$  为 3.66~3.96 mm、 $H_{z2}$  为 2.72 mm。由于型孔取较大值有益于提高小麦充种性能, 故小麦种子型孔参数取  $L_{z2}$  为 8 mm、 $B_{z2}$  为 5 mm、 $H_{z2}$  为 4 mm<sup>[24]</sup>, 油菜的型孔参数  $L_{z1}$  取 3.3 mm、 $B_{z1}$  取 2.9 mm、 $H_{z1}$  取 2.1 mm。

型孔轮式排种器单粒取种对型孔要求较高, 且投种效果难以保证, 在充种、投种等过程中易因种子受挤压而产生破损或堵塞型孔现象, 进而造成缺苗断垄。通过对型孔结构尺寸的研究, 设计一种带有后倾角的倾斜倒锥型孔, 增大了型孔后部空间, 减少了种子在投种区的阻力, 使其可沿倾角顺利投种, 从而进一步解决种子易堵塞型孔及易破损问题。型孔锥顶角  $\epsilon$  为  $12^\circ$ , 后倾角  $\beta$  范围可通过几何关系确定, 单个型孔边沿与后倾角宽度之和  $b$  与型孔高度  $H_z$  夹角约为  $90^\circ$ , 后倾角计算公式见式(3), 型孔结构图如图3所示。

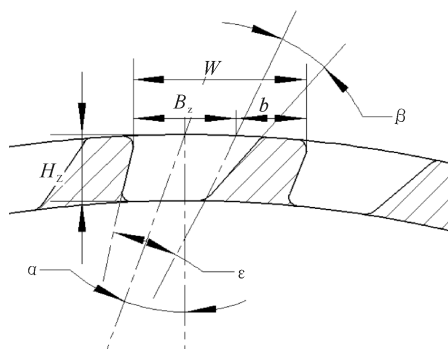


图3 型孔结构示意图

Fig.3 Structure of model-hole

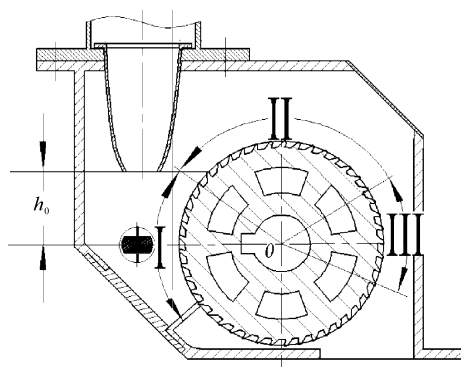
$$\begin{cases} W = \frac{\pi D}{Z} \\ W = B_z + b \\ \beta_{\max} = \arctan \frac{b}{H_z} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,  $W$  为型孔单元上部宽, mm;  $D$  为型孔轮直径,  $D = 80$  mm;  $Z$  为型孔轮单圈齿数, 油菜齿数  $Z_1 = 45$ , 小麦齿数  $Z_2 = 30$ ;  $b$  为型孔边沿与后倾角宽度之和, mm;  $B_z$  为型孔宽, 油菜型孔宽  $B_{z1} = 2.9$

mm, 小麦型孔宽  $B_{z2} = 5$  mm;  $H_z$  为型孔高, 油菜型孔高  $H_{z1} = 2.1$  mm, 小麦型孔高  $H_{z2} = 4$  mm;  $\beta_{\max}$  为最大型孔后倾角,  $(^\circ)$ 。由式(3)知, 油菜最大型孔后倾角  $\beta_{\max1} = 52^\circ$ , 小麦最大型孔后倾角  $\beta_{\max2} = 40^\circ$ , 为减小种子破损率, 需将型孔各棱角处倒圆角, 油菜型孔后倾角  $\beta_1$  取  $0 \sim 30^\circ$ , 小麦型孔后倾角  $\beta_2$  取  $0 \sim 15^\circ$ 。

### 1.3 集排器排种过程力学分析

该集排器排种过程包括充种、携种、投种、输种阶段, 通过对各阶段进行力学分析, 明确了种子在排种过程中的运动状态, 进而确定影响充种角、投种角的因素, 为集排器的设计及参数优化提供理论依据。集排器充种、携种、投种阶段排种区域如图4所示。



$h_0$ : 充填高度 Filling height; I: 充种区 Seed filling zone; II: 携种区 Seed carrying zone; III: 投种区 Seed throwing zone.

图4 排种区域示意图

Fig.4 Structure of seeding area

1) 充种过程力学分析。充种过程是排种过程中的关键环节之一, 种子由种箱落入充种室, 部分种子通过种群挤压及自身重力作用从种群中分离, 产生充入型孔的趋势, 并随着型孔轮的转动进而完成充入型孔的过程。种子在充种区的受力分析如图5所示。

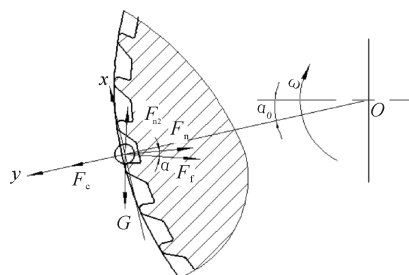


图5 种子充种过程受力分析

Fig.5 Mechanics analysis of seed filling process

沿种子运动的切向和法向建立辅助坐标系, 充种过程受力平衡方程如式(4)所示。

$$\begin{cases} F_{n2} \cos \alpha - F_n \sin \alpha_0 - F_f \sin \alpha = G \cos \alpha_0 \\ F_n \cos \alpha_0 + F_f \cos \alpha_0 + F_{n2} \sin \alpha - G \sin \alpha_0 \geq F_c \\ F_f = \mu F_{n2} \\ F_c = m \omega^2 r \\ G = mg \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中,  $m$  为种子的质量, kg;  $G$  为种子的重力, N;  $F_f$  为种子与型孔间的摩擦力, N;  $F_n$  为种子的侧向压力, N;  $F_{n2}$  为型孔底边对种子的支持力, N;  $F_c$  为种子的惯性离心力, N;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $r$  为型孔轮半径,  $r = 40 \text{ mm}$ ;  $\omega$  为型孔轮的角速度,  $\text{rad/s}$ ;  $\mu$  为型孔轮与种子间的摩擦系数, 油菜种子取 0.3, 小麦种子取 0.55;  $\alpha_0$  为  $y$  轴与水平面夹角,  $(^\circ)$ ;  $\alpha$  为型孔倾角,  $\alpha = 20^\circ$ 。

由式(4)得:

$$\begin{cases} \alpha_0 \geq \arccos\left(\frac{\omega^2 r}{g \sqrt{1+K_s^2}}\right) - \arctan\left(\frac{1}{K_s}\right) \\ K_s = \frac{\mu \cos \alpha + \sin \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, 种子的初始充种位置  $\alpha_0$  与种子物料特性  $\mu$ 、型孔轮角速度  $\omega$  有关。其他条件不变时, 初始充种角  $\alpha_0$  随角速度  $\omega$  的增加而降低。当集排器主轴转速范围为  $10 \sim 60 \text{ r/min}^{[21]}$ , 即角速度范围为  $1.05 \sim 6.28 \text{ rad/s}$  时, 初始充种角最小为  $32^\circ$ , 最大为  $38^\circ$ 。

图 4 中以型孔轮水平中线高度为基准高度, 可知充填高度:

$$h_0 = -r \sin \alpha_0 \quad (6)$$

结合图 4 以及式(4)、(6), 当初始充种角一定时, 充填高度越大, 充种区域越大, 进而增加充种时间, 种子越易充入型孔。当充填高度一定时, 为增大充种时间, 初始充种角取最大值带入式(6), 结合集排器结构, 最小充填高度  $h_{0\min} = -10 \text{ mm}$ , 即低于基准高度  $10 \text{ mm}$ 。

2) 携种过程力学分析。当种子充入型孔后, 随着型孔轮的转动, 型孔中多余的种子靠自重落回充种区从而实现清种功能, 型孔中的种子随即进入携种区。如图 6 所示, 为种子在携种区的受力分析。

由于  $F_{n1}$  的方向接近于  $F_c$ , 故两者夹角约为  $0$ , 可视同为同向, 式(7)为充种结束时种子受力平衡方程。

$$\begin{cases} y_1 = F_c + F_{n1} \\ y_2 = G \sin \beta_0 + F_{n2} \sin \alpha \\ G \cos \beta_0 = F_{n2} \cos \alpha \\ G = mg \end{cases} \quad (7)$$

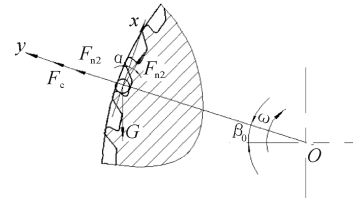


图 6 携种过程受力分析

Fig.6 Mechanics analysis of seed carrying process

式(7)中,  $y_1$  为  $y$  轴正方向受力之和, N;  $y_2$  为  $y$  轴负方向受力之和, N;  $G$  为种子的重力, N;  $m$  为种子的质量, kg;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $F_{n1}$  为型孔底边对种子的支持力, N;  $F_{n2}$  为型孔侧边对种子的支持力, N;  $F_c$  为种子的惯性离心力, N;  $\beta_0$  为  $y$  轴与水平面夹角,  $(^\circ)$ ;  $\alpha$  为型孔倾角,  $\alpha = 20^\circ$ 。由式(7)可得:

$$\begin{cases} y_1 = m \omega^2 r + F_{n1} \\ y_2 = mg (\sin \beta_0 + 0.36 \cos \beta_0) \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)知, 当  $\beta_0 = 0^\circ \sim 70^\circ$  时,  $y_2$  随  $\beta_0$  增大逐渐增加, 当  $\beta_0 = 70^\circ \sim 90^\circ$  时,  $y_2$  随  $\beta_0$  增大逐渐减小, 当转速  $n$  达到最大  $60 \text{ r/min}$ , 即角速度  $\omega$  为  $6.28 \text{ rad/s}$  时,  $y_1$  值最大, 故种子脱离型孔方向最大分力将低于种子靠近型孔轮中心方向最小分力, 即  $y_{1\max} \leq y_{2\min}$ , 种子可始终位于型孔内, 无需护种装置即可顺利到达投种区投种。

3) 投种过程力学分析。种子在投种区的受力分析如图 7 所示。

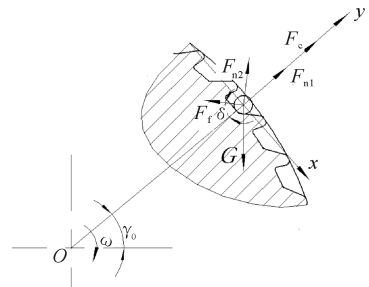


图 7 投种过程受力分析

Fig.7 Mechanics analysis of seed throwing process

当种子处于投种临界状态时, 建立平衡方程, 如式(9)。

$$\begin{cases} F_c + F_{n1} + F_{n2} \sin \delta = G \sin \gamma_0 + F_f \cos \delta \\ F_{n2} \cos \delta + F_f \sin \delta = G \cos \gamma_0 \\ F_f = \mu F_{n2} \\ G = mg \\ F_c = m \omega^2 r \\ \delta = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \beta) \end{cases} \quad (9)$$



式(9)中,  $G$  为种子的重力,  $N$ ;  $F_{n1}$  为型孔底边对种子的支持力,  $N$ ;  $F_{n2}$  为型孔侧边对种子的支持力,  $N$ ;  $F_c$  为种子的惯性离心力,  $N$ ;  $F_f$  为种子与型孔间的摩擦力,  $N$ ;  $\gamma_0$  为  $y$  轴与水平面夹角,  $(^\circ)$ ;  $\delta$  为  $F_{n2}$  与  $y$  轴的夹角,  $(^\circ)$ ;  $\alpha$  为型孔倾角,  $\alpha = 20^\circ$ ;  $\beta$  为型孔后倾角,  $(^\circ)$ ;  $\mu$  为型孔轮与种子间的摩擦系数, 油菜种子取 0.3, 小麦种子取 0.55。由式(9)可得:

$$\begin{cases} \omega = \sqrt{\frac{g}{r} (\sin\gamma_0 + K_1 \cos\gamma_0)} \\ K_1 = \frac{\mu \cos\delta - \sin\delta}{\cos\delta + \mu \sin\delta} \end{cases} \quad (10)$$

易知函数  $K_1$  为减函数, 根据型孔结构分析, 油菜型孔最大后倾角  $\beta_{\max1}$  为  $30^\circ$ , 小麦型孔最大后倾角  $\beta_{\max2}$  为  $15^\circ$ , 故函数  $K_1$  恒小于 0。据一个函数与它的反函数在相应区间内单调性一致原则, 由式(10)可知, 当型孔后倾角  $\beta$  一定时, 投种角  $\gamma_0$  随着角速度的增加而增加。当角速度一定时, 在一定范围内投种角  $\gamma_0$  随后倾角的增加而增加, 即增大后倾角和提高转速可使投种位置提前, 增大投种时间, 避免出现型孔堵塞现象。当油菜型孔后倾角为  $0^\circ \sim 30^\circ$ 、小麦型孔后倾角为  $0^\circ \sim 15^\circ$ , 油菜、小麦的最大投种角可达  $40.8^\circ$ 、 $34.4^\circ$ 。

4) 输种过程分析。种子离开投种口后进入输种阶段。考虑到零速投种, 输种管应向直播机前进方向后部倾斜, 在输种过程中, 种子始终与管壁接触。输种过程的受力分析如图 8 所示, 式(11)为输种过程中种子受力分析方程。

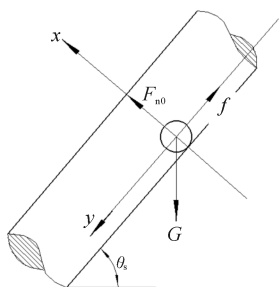


图 8 输种过程受力分析

Fig.8 Mechanics analysis of seed delivering process

$$\begin{cases} F_y = G \sin\theta_s - f \\ F_{n0} = G \cos\theta_s \\ F_f = \mu_0 F_{n1} \\ G = mg \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中:  $F_y$  为种子在  $y$  轴方向上的合力,  $N$ ;  $F_{n0}$  为输种管对种子的支持力,  $N$ ;  $F_f$  为种子与输种

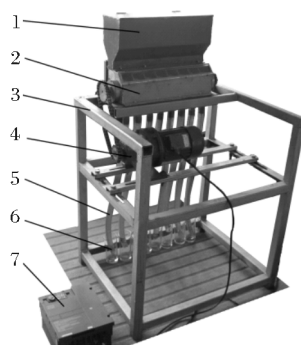
管间的摩擦力,  $N$ ;  $G$  为种子的重力,  $N$ ;  $\theta_s$  为输种管与水平面夹角,  $(^\circ)$ ;  $\mu_0$  为输种管与种子间的摩擦系数。为使种子顺利通过输种管, 由式(11)知:

$$\theta_s > \arctan\mu_0 \quad (12)$$

油菜、小麦与输种管摩擦系数分别为 0.10、0.63, 为保证种子能顺利通过输种管, 同时考虑投种高度不宜过高, 油菜、小麦输种管与水平面夹角  $\theta_s$  取  $33^\circ$ 。

#### 1.4 排种性能试验

试验材料为华油杂 62 和郑麦 9023, 华油杂 62 的千粒重为 4.72 g, 含水率为 4.58%; 郑麦 9023 的千粒重为 48.77 g, 含水率为 4.1%。采用自制的排种试验台开展试验, 如图 9 所示。通过对集排器排种过程的力学分析, 确定了影响该集排器排种性能的主要参数为型孔后倾角、充填高度及集排器工作转速。参照文献[25], 以影响集排器排种性能的主要参数为试验因素, 考虑两因素交互作用, 开展三因素三水平正交试验, 确定集排器单行排量稳定性达到较优时各试验因素的较优组合, 并在较优组合条件下, 以各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数、排种速率及种子破损率为试验指标开展验证试验, 确定集排器整体排种性能。试验中收集 1 min 内集排器每行排出的油菜或小麦种子, 并用电子秤称量其质量, 每种条件下试验重复 5 次。



1.种箱 Seed box; 2.集排器主体 Collector body; 3.试验台架 Test bench; 4.减速电机 Geared motor; 5.输种管 Seed delivering tube; 6.盛种杯 Seed cup; 7.变频器 Frequency converter.

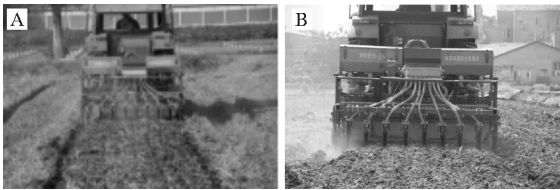
图 9 排种试验台

Fig.9 Platform of the seed metreing device

#### 1.5 田间试验

2017 年 11 月和 2018 年 9 月分别在湖北省农业科学研究院试验田及华中农业大学试验田以东方红 LX804 拖拉机为动力、以 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机为平台, 在正交试验所得较优参数组合

下,开展油麦兼用斜锥型孔轮式集排器田间试验,如图 10 所示。拖拉机前进速度为 1.63 km/h,土壤含水率约为 32%,根据播种农艺要求,通过调节传动比将油菜、小麦播种量分别设定为 6、150 kg/hm<sup>2</sup>。



A.油菜田间试验 Field experiment for rapeseed; B.小麦田间试验 Field experiment for wheat.

图 10 田间播种试验  
Fig.10 Field-seeding test

## 2 结果与分析

### 2.1 排种性能试验结果

由于排种小麦时需在充种区安装搅种轴,故小麦充填高度相较油菜高,结合排种过程力学分析,确定油菜、小麦正交试验因素与水平如表 1 所示。试验方案及试验结果如表 2 所示,表 2 中 9、10、12、13 为空列,未在表中列出, $K_a$ 、 $K_b$  分别为单行油菜、小麦排量稳定性变异系数。表 3 为油菜、小麦正交试验方差分析结果。

试验结果表明:对于油菜,型孔后倾角 A、充填高度与转速交互作用( $B\times C$ )对排量稳定性变异系数影响极显著,充填高度 B 对排量稳定性变异系数

表 1 正交试验因素与水平

| Table 1 Factors and levels of the orthogonal experiment |                              |          |                |          |  |  |                  |          |
|---------------------------------------------------------|------------------------------|----------|----------------|----------|--|--|------------------|----------|
| 水平 Level                                                | A 型孔后倾角/(°)                  |          | B 充填高度/mm      |          |  |  | C 转速/(r/min)     |          |
|                                                         | Back rake angle of hole-type |          | Filling height |          |  |  | Rotational speed |          |
|                                                         | 油菜 Rapeseed                  | 小麦 Wheat | 油菜 Rapeseed    | 小麦 Wheat |  |  | 油菜 Rapeseed      | 小麦 Wheat |
| 1                                                       | 10                           | 5        | —5             | 10       |  |  | 10               | 15       |
| 2                                                       | 20                           | 10       | 0              | 15       |  |  | 20               | 25       |
| 3                                                       | 30                           | 15       | 5              | 20       |  |  | 30               | 35       |

表 2 正交试验方案与试验结果

| Table 2 The orthogonal experiment scheme and text results |   |   |                    |                    |   |                    |                    |                    |                    |          |          |
|-----------------------------------------------------------|---|---|--------------------|--------------------|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|----------|
| 试验序号<br>Number                                            | 1 | 2 | 3                  | 4                  | 5 | 6                  | 7                  | 8                  | 11                 | $K_a$ /% | $K_b$ /% |
|                                                           | A | B | (A×B) <sub>1</sub> | (A×B) <sub>2</sub> | C | (A×C) <sub>1</sub> | (A×C) <sub>2</sub> | (B×C) <sub>1</sub> | (B×C) <sub>2</sub> |          |          |
| 1                                                         | 1 | 1 | 1                  | 1                  | 1 | 1                  | 1                  | 1                  | 1                  | 3.02     | 1.13     |
| 2                                                         | 1 | 1 | 1                  | 1                  | 2 | 2                  | 2                  | 2                  | 2                  | 6.68     | 3.32     |
| 3                                                         | 1 | 1 | 1                  | 1                  | 3 | 3                  | 3                  | 3                  | 3                  | 7.56     | 5.90     |
| 4                                                         | 1 | 2 | 2                  | 2                  | 1 | 1                  | 1                  | 2                  | 3                  | 6.94     | 2.46     |
| 5                                                         | 1 | 2 | 2                  | 2                  | 2 | 2                  | 2                  | 3                  | 1                  | 3.19     | 1.50     |
| 6                                                         | 1 | 2 | 2                  | 2                  | 3 | 3                  | 3                  | 1                  | 2                  | 3.69     | 3.86     |
| 7                                                         | 1 | 3 | 3                  | 3                  | 1 | 1                  | 1                  | 3                  | 2                  | 2.15     | 0.40     |
| 8                                                         | 1 | 3 | 3                  | 3                  | 2 | 2                  | 2                  | 1                  | 3                  | 2.81     | 1.30     |
| 9                                                         | 1 | 3 | 3                  | 3                  | 3 | 3                  | 3                  | 2                  | 1                  | 5.65     | 1.10     |
| 10                                                        | 2 | 1 | 2                  | 3                  | 1 | 2                  | 3                  | 1                  | 1                  | 1.50     | 0.50     |
| 11                                                        | 2 | 1 | 2                  | 3                  | 2 | 3                  | 1                  | 2                  | 2                  | 2.86     | 1.00     |
| 12                                                        | 2 | 1 | 2                  | 3                  | 3 | 1                  | 2                  | 3                  | 3                  | 2.51     | 1.40     |
| 13                                                        | 2 | 2 | 3                  | 1                  | 1 | 2                  | 3                  | 2                  | 3                  | 5.46     | 0.98     |
| 14                                                        | 2 | 2 | 3                  | 1                  | 2 | 3                  | 1                  | 3                  | 1                  | 2.09     | 0.67     |
| 15                                                        | 2 | 2 | 3                  | 1                  | 3 | 1                  | 2                  | 1                  | 2                  | 2.42     | 1.58     |
| 16                                                        | 2 | 3 | 1                  | 2                  | 1 | 2                  | 3                  | 3                  | 2                  | 2.80     | 1.94     |
| 17                                                        | 2 | 3 | 1                  | 2                  | 2 | 3                  | 1                  | 1                  | 3                  | 3.14     | 2.34     |
| 18                                                        | 2 | 3 | 1                  | 2                  | 3 | 1                  | 2                  | 2                  | 1                  | 2.26     | 2.33     |
| 19                                                        | 3 | 1 | 3                  | 2                  | 1 | 3                  | 2                  | 1                  | 1                  | 2.63     | 1.42     |
| 20                                                        | 3 | 1 | 3                  | 2                  | 2 | 1                  | 3                  | 2                  | 2                  | 4.21     | 1.90     |
| 21                                                        | 3 | 1 | 3                  | 2                  | 3 | 2                  | 1                  | 3                  | 3                  | 4.28     | 2.45     |
| 22                                                        | 3 | 2 | 1                  | 3                  | 1 | 3                  | 2                  | 2                  | 3                  | 6.18     | 0.54     |
| 23                                                        | 3 | 2 | 1                  | 3                  | 2 | 1                  | 3                  | 3                  | 1                  | 1.11     | 0.93     |
| 24                                                        | 3 | 2 | 1                  | 3                  | 3 | 2                  | 1                  | 1                  | 2                  | 2.22     | 1.41     |
| 25                                                        | 3 | 3 | 2                  | 1                  | 1 | 3                  | 2                  | 3                  | 2                  | 1.66     | 2.95     |
| 26                                                        | 3 | 3 | 2                  | 1                  | 2 | 1                  | 3                  | 1                  | 3                  | 2.78     | 3.60     |
| 27                                                        | 3 | 3 | 2                  | 1                  | 3 | 2                  | 1                  | 2                  | 1                  | 1.88     | 3.64     |

续表 2 Continued Table 2

| 试验序号<br>Number | 1     | 2     | 3                      | 4                      | 5     | 6                      | 7                      | 8                      | 11                     | $K_a/\%$ | $K_b/\%$ |
|----------------|-------|-------|------------------------|------------------------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|----------|
|                | A     | B     | (A×<br>B) <sub>1</sub> | (A×<br>B) <sub>2</sub> | C     | (A×<br>C) <sub>1</sub> | (A×<br>C) <sub>2</sub> | (B×<br>C) <sub>1</sub> | (B×<br>C) <sub>2</sub> |          |          |
| $K_{a1}$       | 41.69 | 35.25 | 34.97                  | 33.55                  | 32.34 | 27.40                  | 28.58                  | 24.21                  | 23.33                  |          |          |
| $K_{a2}$       | 25.04 | 33.30 | 27.01                  | 33.14                  | 28.87 | 30.82                  | 30.34                  | 42.12                  | 28.69                  |          |          |
| $K_{a3}$       | 26.95 | 25.13 | 31.70                  | 26.99                  | 32.47 | 35.46                  | 34.76                  | 27.35                  | 41.66                  |          |          |
| $R$            | 16.65 | 10.12 | 7.96                   | 6.56                   | 3.60  | 8.06                   | 6.18                   | 17.91                  | 18.33                  |          |          |
| $K_{b1}$       | 20.97 | 19.02 | 19.84                  | 23.77                  | 12.32 | 15.73                  | 15.50                  | 17.14                  | 13.22                  |          |          |
| $K_{b2}$       | 12.74 | 13.93 | 20.91                  | 20.20                  | 16.56 | 17.04                  | 16.34                  | 17.27                  | 18.36                  |          |          |
| $K_{b3}$       | 18.84 | 19.60 | 11.80                  | 8.58                   | 23.67 | 19.78                  | 20.71                  | 18.14                  | 20.97                  |          |          |
| $R$            | 8.23  | 5.67  | 9.11                   | 15.19                  | 11.35 | 4.05                   | 5.21                   | 1.00                   | 7.75                   |          |          |

注 Note: $K_a$ :油菜排量稳定性变异系数 Variation coefficient of stablilty of the displacement for rapeseed; $K_b$ :小麦排量稳定性变异系数 Variation coefficient of stablilty of the displacement for wheat.下同;The same as below.

表 3 正交试验方差分析结果

Table 3 Results of analysis of the orthogonal experiment

| 试验指标<br>Test index                                                                                       | 方差来源<br>Variance<br>sources | 离差平方和<br>Sum of squares<br>of deviations | 自由度<br>df | 均方差<br>Mean square<br>deviation | $F$    | 显著性<br>Significance |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|-----------|---------------------------------|--------|---------------------|
| 油菜排量稳定性<br>变异系数/ $\%K_a$<br>Variation coefficient<br>of stablilty of the<br>displacement for<br>rapeseed | A                           | 18.450                                   | 2         | 9.225                           | 15.159 | * *                 |
|                                                                                                          | B                           | 6.406                                    | 2         | 3.203                           | 5.264  | *                   |
|                                                                                                          | C                           | 0.927                                    | 2         | 0.463                           | 0.761  |                     |
|                                                                                                          | AB                          | 6.558                                    | 4         | 1.640                           | 2.694  |                     |
|                                                                                                          | BC                          | 40.064                                   | 4         | 10.016                          | 16.459 | * *                 |
|                                                                                                          | AC                          | 5.889                                    | 4         | 1.472                           | 2.420  |                     |
| 小麦排量稳定性<br>变异系数/ $\%K_b$<br>Variation coefficient of<br>stablilty of the displacement<br>for wheat       | A                           | 4.055                                    | 2         | 2.028                           | 4.921  | *                   |
|                                                                                                          | B                           | 2.164                                    | 2         | 1.082                           | 2.625  |                     |
|                                                                                                          | C                           | 7.309                                    | 2         | 3.654                           | 8.869  | * *                 |
|                                                                                                          | AB                          | 19.533                                   | 4         | 4.883                           | 11.851 | * *                 |
|                                                                                                          | BC                          | 3.522                                    | 4         | 0.881                           | 2.137  |                     |
|                                                                                                          | AC                          | 2.689                                    | 4         | 0.672                           | 1.631  |                     |

注: \* \* 表示极显著( $P<0.01$ ), \* 表示显著( $P<0.05$ )。Note: \* \* is very significant( $P<0.01$ ), \* is significant( $P<0.05$ ).

表 4 油菜正交试验 BC 搭配表

Table 4 Arrangement of factors B and C for rapeseed

| 项目 Item | $C_1$                  | $C_2$                  | $C_3$                  |
|---------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $B_1$   | $3.02+1.50+2.63=7.15$  | $6.68+2.86+4.21=13.75$ | $7.56+2.51+4.28=14.35$ |
| $B_2$   | $6.94+5.46+6.18=18.58$ | $3.19+2.09+1.11=6.39$  | $3.69+2.42+2.22=8.33$  |
| $B_3$   | $2.15+2.80+1.66=6.61$  | $2.81+3.14+2.78=8.73$  | $5.65+2.26+1.88=9.79$  |

表 5 小麦正交试验 AB 搭配表

Table 5 Arrangement of factors A and B for wheat

| 项目 Item | $A_1$                  | $A_2$                 | $A_3$                  |
|---------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| $B_1$   | $1.13+3.32+5.90=10.35$ | $0.50+1.00+1.40=2.90$ | $1.42+1.90+2.45=5.77$  |
| $B_2$   | $2.46+1.50+3.86=7.82$  | $0.98+0.67+1.58=3.23$ | $0.54+0.93+1.41=2.88$  |
| $B_3$   | $0.40+1.30+1.10=2.80$  | $1.94+2.34+2.33=6.61$ | $2.95+3.60+3.64=10.19$ |

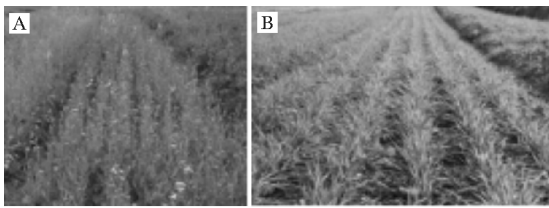
影响显著,转速 C、型孔后倾角与充填高度及转速交互作用( $A\times B$ 、 $A\times C$ )对排量稳定性变异系数影响不显著。降低油菜排种稳定性变异系数主次顺序依次为转速与充填高度的交互作用( $B\times C$ )、型孔后倾角 A,通过表 4 的 BC 搭配表可知 BC 的交互作用是  $B_2C_2$  较好,由极差分析知型孔后倾角 A 取 2 水平较好,故对降低油菜排量稳定性能变异系数较优参数组合为  $A_2B_2C_2$ ,即型孔后倾角为  $20^\circ$ 、充填高度为 0 mm即基准高度(与型孔轮水平中线高度一致)、转速为 20 r/min;对于小麦,型孔后倾角与充填高度的交互作用( $A\times B$ )、转速 C 对排量稳定性变异系数影响极显著,型孔后倾角 A 对排量稳定性变异系数影响显著,充填高度 B、后倾角及充填高度与转速的交互作用( $A\times C$ 、 $B\times C$ )对排量稳定性变异系数影响不显著。降低小麦排种稳定性变异系数主次顺序依次为型孔后倾角与转速的交互作用( $A\times B$ )、转速

C,通过表5的AB搭配表可知AB的交互作用是 $A_1B_3$ 较好,由极差分析知转速C取1水平较好,故对降低小麦排量稳定性变异系数较优参数组合为 $A_1B_3C_1$ 即型孔后倾角为 $5^\circ$ 、充填高度为20 mm、转速为15 r/min。

在油菜、小麦排量稳定性较优参数组合下验证试验结果为:油菜、小麦各行排量一致性变异系数分别低于6.00%、6.32%,总排量稳定性变异系数分别低于1.25%、1.00%,种子破损率均低于0.5%,油菜、小麦平均单行排种速率分别为9.05、87.85 g/min,理论排种速率为8.5~16.99、65.84~131.6 g/min,满足油菜、小麦播种要求。

## 2.2 田间试验

田间试验30 d后,对8行油菜、小麦播种均匀性进行测定,每行随机选取10段,每段测量长度为1.0 m,油菜播种均匀性变异系数为15.87%,种植密度为71~82株/ $m^2$ ,满足NY/T 2709—2015《油菜播种机作业质量》<sup>[26]</sup>要求,小麦播种均匀性变异系数为24.40%,种植密度为179~210株/ $m^2$ ,满足JB/T 6274.1—2013《谷物播种机技术条件》<sup>[27]</sup>要求。如图11A为初花期油菜生长效果,图11B为小麦出苗效果,油菜、小麦长势良好,田间均无断条现象。



A.初花期油菜生长效果 Growth effect of initial flowering for rapeseed; B.小麦出苗效果 Emergence performance of wheat.

图11 田间生长效果

Fig.11 Field growth effect

## 3 讨论

本研究设计了一种无需清种与护种装置的油菜兼用斜锥型孔轮式集排器。通过结合油菜、小麦种子的物料参数和种植农艺要求,设计了一种油菜双圈、小麦3圈型孔交错排布的形式及一种带有后倾角的斜锥型孔结构,满足油菜、小麦播种要求且进一步有效控制排种过程中种子易破损、堵塞型孔的问题。构建了充种、携种、投种、输种过程的力学模型,对充种过程分析,确定了最小充填高度比基准高度低10 mm;经携种分析,简化了清种、护种环节,验证了该集排器结构的合理性;投种过程显示油菜、小

麦型孔后倾角低于 $30^\circ$ 、 $15^\circ$ 时,油菜、小麦的最大投种角可达 $40.8^\circ$ 、 $34.4^\circ$ ;输种过程确定了油菜、小麦输种管与水平面夹角需不小于 $33^\circ$ 。通过正交试验确定了降低油菜、小麦排量稳定性变异系数的较优参数组合分别为:型孔后倾角 $20^\circ$ 、充填高度为基准高度、转速20 r/min,型孔后倾角 $5^\circ$ 、充填高度20 mm、转速15 r/min。在较优参数组合下开展田间验证试验,油菜、小麦各行排量一致性变异系数分别低于6.00%、6.32%,总排量稳定性变异系数分别低于1.25%、1.00%,破损率均低于0.5%。田间试验表明,油菜、小麦的播种均匀性变异系数分别为15.87%、24.40%,种植密度分别为71~82株/ $m^2$ 、179~210株/ $m^2$ 。本研究可满足油菜、小麦兼用播种要求,但由于油菜小麦的播种量差异较大,为分别满足其播量要求,油菜小麦种箱尺寸差异较大,对于种箱结构的兼用性有待后续研究。同时,本研究播量调节范围有限,如何进一步扩大播量调节范围,需深入研究。

## 参考文献

- [1] 丛锦玲.油菜小麦兼用型气力式精量排种系统及其机理研究[D].武汉:华中农业大学,2014.
- [2] 李宝阔.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2009.
- [3] 张波屏.播种机械设计原理[M].北京:机械工业出版社,1982.
- [4] WANG J W, TANG H, WANG J F, et al. Optimization design and experiment on ripple surface type pickup finger of precision maize seed metering device[J]. International journal of agricultural and biological engineering, 2017, 10(1): 61-71.
- [5] 杨锴,段宏兵,宋波涛,等.半杯勾式马铃薯排种器的设计与试验[J].华中农业大学学报,2018,37(2):103-109.
- [6] 周勇,胡梦杰,夏俊芳,等.内充种组合型孔式播量可调棉花精量排种器设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(18):59-67.
- [7] 李姗姗,廖庆喜,王都,等.油菜气力滚花滚筒式精量集排器充种性能仿真分析与试验[J].华中农业大学学报,2017,36(5):99-107.
- [8] 廖庆喜,黄吉星,刘光,等.油菜播种机槽孔轮式精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2011,42(2):63-66.
- [9] 曹秀英,廖庆喜,丛锦玲,等.离心式油菜精量排种器型孔结构设计[J].农业机械学报,2014,45(S1):40-46.
- [10] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等.油菜精量播种技术研究进展[J].农业机械学报,2017,48(9):1-16.
- [11] 赵晓顺,于华丽,张晋国,等.槽缝气吸式小麦精量排种器[J].农业机械学报,2013,44(2):48-51;74.
- [12] 刘俊峰,王廷双,冯静晓,等.内充种垂直轮式新型小麦精量排种器的研究[J].农业工程学报,1997,13(4):91-94.
- [13] 孙永海,胡树荣.倾斜轮孔式小麦精密排种器[J].农业机械学报,1993,24(1):43-48.
- [14] 梁素钰,封俊,曾爱军,等.新型组合吸孔式小麦精密排种器性能的试验研究[J].农业工程学报,2001,17(2):84-87.
- [15] 杨波,廖庆喜,李旭,等.气力式油菜、小麦兼用精量排种器设计



- 及排种分析[J].农业工程,2011,1(1):97-101;96.
- [16] 张宇文.机械式多功能精密排种器的设计[J].农业机械学报,2005,36(3):51-53,50.
- [17] 丛锦玲,廖庆喜,曹秀英,等.油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能[J].农业工程学报,2014,30(8):30-39.
- [18] 雷小龙.油麦兼用型气送式集排器设计及其工作机理[D].武汉:华中农业大学,2017.
- [19] BARUT Z B,ÖZMERZI A.Effect of different operating parameters on seed holding in the single seed metering unit of a pneumatic planter[J].Turkish journal of agricultural machinery,2004,28(6):435-441.
- [20] YAZGI A,DEGIRMENCIOGLU A.Optimization of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J].Biosystems engineering,2007,97(3):347-356.
- [21] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册:上册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [22] 任永源,丁厚栋,林宝刚,等.播期和播量对直播油菜产量的影响[J].浙江农业科学,2008(3):319-321.
- [23] 李兰真,汤景华,汤新海,等.不同类型小麦品种播期、播量研究[J].河南农业科学,2007(11):38-41.
- [24] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等.油菜小麦兼用气送式集排器供种装置设计及试验[J].农业工程学报,2015,31(20):10-18.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 9478 — 2005:谷物条播机试验方法[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [26] 中华人民共和国农业部.NY/T 2709 — 2015:油菜播种机作业质量[S].北京:中国农业出版社,2015.
- [27] 中华人民共和国工业和信息化部.JB/T 6274.1 — 2013:谷物播种机技术条件[S].北京:中国青年出版社,2014.

## Design and test of oblique taper hole-type wheel centralized metering device for rapeseed and wheat

XING Hechen LIAO Qingxi WANG Lei WANG Du LIAO Yitao WANG Di YU Qi

*College of Engineering, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China*

**Abstract** An oblique taper hole-type wheel centralized metering device for rapeseed and wheat without cleaning and protection device was developed to satisfy the requirements of planting rapeseed and wheat in the middle and lower reaches of the Yangtze River in China, and to improve the efficiency of the planter and simplify the structure of the planter. The key component of the metering device was the hole-type wheel designed with two rows of staggered holes for rapeseed and three rows for wheat. An oblique tapered hole structure was developed to prevent seed from plugging holes and reduce the damage rate of seed. The mechanical model of filling, carrying, throwing, and delivering seed were established. The results showed that the minimum height of the seed filling was 10 mm lower than the reference height. The rationality of the device structure was verified. The maximum seeding angle of rapeseed and wheat reached  $40.8^\circ$  and  $34.4^\circ$  when the back angle of the hole ranged from  $0^\circ$  to  $30^\circ$  and from  $0^\circ$  to  $15^\circ$ , respectively. The angle between the seed tube and the horizontal plane should be no less than  $33^\circ$ . The results of orthogonal test showed that the back angle of the hole was  $20^\circ$ , the filling height was the reference height, the rotation speed was 20 r/min for rapeseed. The back angle of the hole was  $5^\circ$ , the filling height was 20 mm, the rotation speed was 15 r/min for wheat. The variation coefficient of the consistency of each line displacement was less than 6.00% for rapeseed and 6.32% for wheat. The coefficient of variation of total displacement stability was less than 1.25% for rapeseed and 1.00% for wheat. The damage rate of both rapeseed and wheat was less than 0.5%. The results of field test showed that both rapeseed and wheat had good sowing. It will provide a reference for designing the structure of mechanical seed metering device for rapeseed and wheat.

**Keywords** dual purpose seed metering device; oblique hole-type wheel; damage rate; multi-row seeding; rapeseed; wheat

(责任编辑:陆文昌)